

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.253

Алгоритм детектирования эпилептиформной активности ЭЭГ при отсроченной ишемии головного мозга

¹Обухов Ю.В., ¹Кершнер И.А., ²Окунева И.В., ²Синкин М.В.

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

²НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского, <https://sklif.mos.ru/>

Москва 129090, Российская Федерация

E-mail: yuvobukhov@mail.ru, ivan.kersbner@gmail.com, mvsinkin@gmail.com, okunevaiv@mail.ru

Поступила 15.08.2023, рецензирована 18.08.2023, принята 21.08.2023

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

Аннотация: Предложен и описан алгоритм автоматического детектирования эпилептиформной активности в данных мониторинга ЭЭГ при отсроченной ишемии после кровоизлияния в субарахноидальное пространство головного мозга. Алгоритм базируется на формализации визуальных характеристик эпилептиформной активности в виде паттерна пик-волнового разряда и анализе взаимной корреляции сигналов многоканальной ЭЭГ с выбранным паттерном. Фрагменты эпилептиформной активности в каждой паре биполярных электродов определялись из трех условий согласно с описанием пик-волновых разрядов эпилептиформной активности: 1) значение положительной взаимной корреляции в пике корреляционной функции должно быть больше 0.4; 2) следом за положительным пиком взаимной корреляции должен следовать пик с отрицательной корреляцией; 3) ширина пика отрицательной взаимной корреляции на полувысоте должна быть как минимум в 2 раза больше таковой у предшествующего положительного пика положительной взаимной корреляции. Как и при визуальном обнаружении эпилептиформной активности нейрофизиологом выбирались одновременные пик-волновые разряды в нескольких биполярных электродах. Приведены результаты тестирования алгоритма на часовой записи ЭЭГ пациентки в отсроченной ишемией. Фрагментов с эпилептиформной активностью за рассматриваемый час было выделено 17 в правом полушарии и 2 – в левом. Межполушарная асимметрия обусловлена правосторонней аневризмой у пациента. Время работы алгоритма на современном персональном компьютере составляет не более 5 минут для обработки 16 биполярных сигналов, поэтому он может быть использован для вычисления почасового количества эпилептиформной активности практически в реальном времени проявления этого показателя отсроченной ишемии после аневризматического субарахноидального кровоизлияния.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, длительный мониторинг, эпилептиформная активность, функция взаимной корреляции, отсроченная ишемия головного мозга

УДК 519.67, 612.1, 53.083, 519.24, 004.93

Благодарности: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22–69–00102, <https://rscf.ru/project/22-69-00102/>.

Для цитирования: Обухов Ю.В., Кершнер И.А., Окунева И.В., Синкин М.В. Алгоритм детектирования эпилептиформной активности ЭЭГ при отсроченной ишемии головного мозга. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(3):253-262. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.253.

Algorithm for detecting epileptiform EEG activity in delayed cerebral ischemia

Yuriy V. Obukhov, Ivan A. Kershner

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: yvobukhov@mail.ru, ivan.kershner@gmail.com

Irina V. Okuneva, Mikhail V. Sinkin

N.V. Sklifosovsky Research Institute of Emergency Medicine, Department of Emergency Neurosurgery, <https://sklif.mos.ru/>

Moscow 129090, Russian Federation

E-mail: mvsinkin@gmail.com, okunevaiv@mail.ru

Received August 15, 2023, peer-reviewed August 18, 2023, accepted August 21, 2023

Abstract: An algorithm for automatic detection of epileptiform activity in EEG monitoring data with delayed ischemia after hemorrhage in the subarachnoid space of the brain is proposed and described. The algorithm is based on the formalization of the visual characteristics of epileptiform activity in the form of a peak-wave discharge pattern and analysis of the mutual correlation of multichannel EEG signals with the selected pattern. Fragments of epileptiform activity in each pair of bipolar electrodes were determined from three conditions according to the description of peak-wave discharges of epileptiform activity: 1) the value of positive mutual correlation at the peak of the correlation function should be greater than 0.4; 2) a positive peak of mutual correlation should be followed by a peak with a negative correlation; 3) the width of the peak of negative mutual correlation at half-altitude should be at least 2 times greater than that of the previous positive peak of positive mutual correlation. As with the visual detection of epileptiform activity, the neurophysiologist selected simultaneous peak-wave discharges in several bipolar electrodes. The results of testing the algorithm on an hour-long EEG recording of a patient with delayed ischemia are presented. Fragments with epileptiform activity during the hour under review were identified 17 in the right hemisphere and 2 in the left. Interhemispheric asymmetry is caused by a right-sided aneurysm in patient. The operating time of the algorithm on a modern personal computer is no more than 5 minutes to process 16 bipolar signals, so it can be used to calculate the hourly amount of epileptiform activity in almost real time of the manifestation of this indicator of delayed ischemia after aneurysmal subarachnoid hemorrhage.

Keywords: electroencephalogram, long-term monitoring, epileptiform activity, mutual correlation function, delayed cerebral ischemia

UDC 519.67, 612.1, 53.083, 519.24, 004.93

Acknowledgments: The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation No. 22–69–00102, <https://rscf.ru/project/22-69-00102/>.

For citation: Yuriy V. Obukhov, Ivan A. Kershner, Irina V. Okuneva, Mikhail V. Sinkin. Algorithm for detecting epileptiform EEG activity in delayed cerebral ischemia. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(3):253–262e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.253.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (255)

2. АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
ЭПИЛЕПТИФОРМНОЙ АКТИВНОСТИ (258)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ КЛИНИЧЕСКИХ
ЗАПИСЕЙ ЭЭГ (259)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (261)

ЛИТЕРАТУРА (261)

1. ВВЕДЕНИЕ

Отсроченная ишемия головного мозга обычно возникает через 4–14 дней после начала нетравматического или травматического кровоизлияния в субарахноидальное пространство головного мозга. Задачами консервативного лечения больных с субарахноидальным кровоизлиянием (САК) являются стабилизация состояния больного, профилактика рецидива САК, профилактика и лечение сосудистого спазма и отсроченной ишемии мозга. Интенсивное лечение проводят в условиях мониторинга основных показателей, характеризующих состояние цереброваскулярной системы и жизненно важных функций. После поступления больного с подозрением на нетравматическое или травматическое САК в отделение реанимации нейрохирургического стационара, проводят детальный неврологический осмотр, оценку тяжести состояния, компьютерную томографию (КТ) и магнитно-резонансную (МРТ) томографию, транскраниальную и экстракраниальную доплерографию (ТКД) для оценки выраженности ангиоспазма, электроэнцефалографию для оценки выраженности изменений биоэлектрической активности головного мозга.

Клинический неврологический осмотр является "золотым стандартом" диагностики отсроченной ишемии головного мозга, однако он требует хорошего речевого контакта с пациентом, что невозможно в случае тяжелого течения САК, сопровождающегося угнетением бодрствования до комы. Методы нейровизуализации, к которым относят КТ и МРТ, остаются "золотым стандартом" инструментальной диагностики отсроченной ишемии, но их главным недостатком является необходимость транспортировки пациента к томографу, что делает невозможным их использование в мониторинговом режиме.

Электроэнцефалография (ЭЭГ) регистрирует биоэлектрическую активность головного мозга, поэтому любое изменение его функционального состояния немедленно отражается на показателях кривых. Изменения на ЭЭГ прямо связаны с показателями объемного кровотока [1]. Признаки (показатели) ишемии головного мозга проявляются на ЭЭГ в реальном времени, что делает этот метод незаменимым для интраоперационного мониторинга во время операций на брахиоцефальных артериях, и в отделении реанимации и интенсивной терапии для ранней диагностики отсроченной ишемии мозга после САК. В случае, если повреждение головного мозга вследствие кровоизлияния привело к угнетению бодрствования до комы и клинический неврологический осмотр затруднен, а КТ требуют транспортировки пациента к аппарату, непрерывный ЭЭГ мониторинг становится основным способом диагностики и прогнозирования развития отсроченной ишемии мозга. Альтернативным подходом является мониторинг ТКД. Этот метод позволяет точно диагностировать вазоспазм, однако сам факт сужения сосуда не всегда приводит к ишемии мозга, а техническая особенность ультразвукового измерения скорости кровотока позволяет определять его лишь в одной небольшой, не превышающей несколько миллиметров, точке, в то время как спазм может быть локализован в другом месте.

Единственным методом, с помощью которого в отделении реанимации можно осуществить непрерывный круглосуточный мониторинг функционального состояния головного мозга пациента с САК с целью диагностики и прогнозирования развития отсроченной ишемии мозга, является ЭЭГ мониторинг. В сочетании с периодическими исследованиями методами нейровизуализации, он позволяет осуществлять раннее выявление

и прогнозирование развития отсроченной ишемии, что дает возможность начать интенсивное лечение и купировать ее развитие. В принципе длительное мониторирование ЭЭГ в реальном времени проявления показателей позволяет диагностировать и прогнозировать развитие отсроченной ишемии и оценивать ее динамику еще до того, как разовьется его инфаркт, а в дальнейшем оценивать восстановление мозговой перфузии даже до клинического улучшения [2-4].

Существующие системы ЭЭГ мониторинга обеспечивают в реальном времени запись в дисковую память ЭЭГ в присутствии приборных артефактов и артефактов жизнедеятельности пациента и одновременно выводят на монитор многоканальные ЭЭГ для визуального наблюдения и анализа врачом. Для выделения интервалов времени с артефактами, обусловленными жизнедеятельностью пациента и обслуживанием его медперсоналом, целесообразно анализировать синхронные с ЭЭГ записи видео.

Обычно анализ результатов продолжительного видео-ЭЭГ мониторинга проводится ретроспективно в режиме офлайн путем просмотра многоканальных ЭЭГ и фрагментов видео. Методология анализа ЭЭГ отсроченной ишемии традиционно строится на визуальном анализе кривых, с выделением безартефактных участков записи и анализом её фоновой структуры, единичных особых графических паттернов, спектральной энергии в некотором интервале времени (как правило, 1 час) в различных частотных диапазонах альфа (8-13 Гц), бета (14-40 Гц), тета (4-8 Гц), дельта (0.5-3 Гц), и их отношение в диапазонах дельта/альфа и (дельта + тета)/(альфа + бета), обладающих специфичностью по отношению к различным клиническим состояниям. Этот анализ является чрезвычайно трудоемкой и

время-затратной работой нейрофизиологов высокой квалификации и, кроме того, объективность такой диагностики существенно варьируется между отдельными специалистами. Учитывая необходимую 10-14-дневную продолжительность мониторирования у пациентов с САК, использование общепринятого анализа графоэлементов визуально ЭЭГ в режиме офлайн практически невозможно и не позволяет оперативно принимать врачебные решения при неблагоприятном развитии отсроченной ишемии.

Поэтому для широкого использования количественной ЭЭГ необходимо разработать автоматизированную систему обнаружения показателей отсроченной ишемии в результате субарахноидального кровоизлияния, которая позволяет детектировать, классифицировать и прогнозировать показатели отсроченной ишемии в реальном времени их проявления [3]. Кроме того, из-за артефактов жизнедеятельности пациента и его обслуживания медицинским персоналом автоматизированный расчет диагностических показателей ЭЭГ без априорного выбора сегментов данных без артефактов или ручного обзора обученными нейрофизиологами является нерешенной задачей автоматических алгоритмов обнаружения отсроченной ишемии.

Многочисленные исследования позволили выделить ЭЭГ паттерны, которые в литературе иногда называют "злокачественными", поскольку они характерны для неблагоприятного прогноза выживания и восстановления сознания [2-4]. К ним относят устойчивое подавление амплитуды фоновой активности ниже 10 мкВ, нарушение непрерывности колебаний кривой ЭЭГ с развитием паттерна "вспышка-подавление", регистрацию генерализованных периодических разрядов с одинаковым межразрядным интервалом и мономорфными

графическими паттернами и др. Основными диагностическими и прогностическими показателями отсроченной ишемии при мониторинге ЭЭГ являются (1) фокальное и региональное замедление, снижение индекса и прекращение быстрой активности; (2) уменьшение вариабельности усредненной по диапазону частот и по отведениям ЭЭГ отдельно в левом и правом полушарии мощности альфа ритма; (3) снижение отношения усредненной мощности ритмов альфа/дельта; (4) эпилептиформные графические паттерны, включая спорадические эпилептиформные разряды, латерализованную ритмичную дельта активность, латерализованные периодические разряды или генерализованные периодические разряды. Латерализованные периодические разряды – это острые колебания, такие как спайки и острые волны, которые возникают более или менее периодически [5]. Недавние исследования эпилептиформных аномалий продемонстрировали их диагностический и прогностический потенциал при мониторинге отсроченной ишемии после САК [3,4].

В работе [6] были опубликованы результаты ретроспективного исследования значений почасового количества эпилептиформных разрядов, определяемых визуально, для прогноза развития отсроченной ишемии после САК. С помощью визуального офлайн-анализа графических паттернов ЭЭГ с применением системы поддержки анализа ЭЭГ Persyst (<https://www.persyst.com/>) было обнаружено, что у многих пациентов с САК почасовое количество эпилептиформных разрядов в час увеличивается в течение первых 3–10 дней после кровоизлияния в мозг – основной период риска для отсроченной ишемии. У пациентов с развивающейся отсроченной ишемией почасовая эпилептиформная активность в течение 3,5–6 дней значительно выше после САК

по сравнению с теми, у кого ишемия не развивается (площадь под ROC-кривой AUC = 0.72).

Наконец, отдельные тенденции динамики эпилептиформных разрядов с течением времени, оцениваемые с помощью группового анализа траектории почасовой нагрузки – количества эпилептиформных разрядов за час, также помогают стратифицировать риск отсроченной ишемии. Аналогичные результаты были получены в исследованиях крыс с фармакологическим провоцированием инсульта легкой, умеренной и тяжелой степени [7]. Максимальная AUC в течение 5 дней после САК составляет 0.61, а в течение 10 дней – 0.68. Эти результаты показали, что почасовое количество эпилептиформных разрядов является полезным параметром для выявления лиц с более высоким риском развития отсроченной ишемии головного мозга после САК. Эти исследования выполнялись нейрофизиологами ретроспективно «вручную» с помощью анализа диагностических показателей в режиме офлайн с применением, как правило, системы поддержки анализа ЭЭГ Persyst (https://www.persyst.com). Анализировались фрагменты многоканальных длительностью 5–15 секунд. Такой анализ, во-первых, является чрезвычайно затратным, во-вторых, зависит от квалификации неврологов [8] и, в-третьих, принципиально не может применяться в режиме реального времени изменения почасового количества эпилептиформных разрядов. В результате в обзоре работ 2022 г. [3] по диагностике отсроченной ишемии головного мозга был сделан вывод о необходимости разработки алгоритмов автоматического обнаружения показателей отсроченной ишемии головного мозга после САК.

В настоящей статье предложен и описан алгоритм автоматического детектирования временных фрагментов ЭЭГ с эпилептиформной активностью,

основанный на анализе функций взаимной корреляции ЭЭГ с характерным фрагментом эпилептиформной активности и результаты его тестирования на клинических данных ЭЭГ-мониторинга пациента после САК.

2. АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭПИЛЕПТИФОРМНОЙ АКТИВНОСТИ

На **Рис. 1** приведена схема расположения электродов в соответствии с международным стандартом 10–20%. При длительном мониторинге ЭЭГ используется биполярный монтаж (дифференциальная схема записи) Fp1-F7, F7-T3, T3-T5, T5-O1, Fp1-F3, F3-C3, C3-P3, P3-O1 - левое полушарие и Fp2-F4, F4-C4, C4-P4, T5-O1, P4-O2, Fp2-F8, F8-T4, T4-T6, T6-O2 – правое полушарие. Биполярная запись ЭЭГ применяется с целью уменьшения трендов и других артефактов. Сигнал записан с частотой дискретизации 250 Гц. Фильтрация сигналов осуществлялась в среде программирования Matlab с помощью фильтров: режекторного (функция `iirnotch`) на частоте 50 Гц, полосового фильтра Баттерворта 8-го порядка (функция `butter`) в диапазоне частот 0.5-70 Гц, удаления линейного тренда (функция `detrend`).

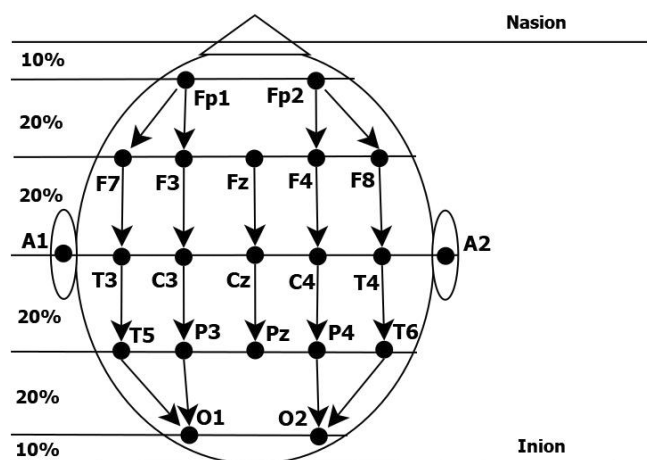


Рис. 1. Расположение электродов ЭЭГ на скальпе в соответствии с международной схемой 10–20%. Четные электроды – на правом полушарии, нечетные – на левом, A1 и A2 – референтные электроды. Стрелками указаны пары электродов при биполярной записи ЭЭГ.

На **Рис. 2** приведен пример 5-секундного фрагмента биполярной ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией после САК в лобной части правого полушария, записанный 14.10.2022 г. Красным кругом выделен фрагмент с четко выраженными для эпилептиформной активности пик-волновыми разрядами в виде острого негативного пика, который связан с возбуждением нейронов, проявляющейся деполяризацией их мембраны с последующей за ним положительной волной, которая связана с реполяризацией и гиперполяризацией нейронов [9].

Из **Рис. 2** видно, что характерными особенностями графоэлемента эпилептиформной активности (см., например, запись в паре каналов C4-P4) является наличие высокоамплитудного (100 мкВ) острого отрицательного пика длительностью на полувысоте 90 мсек и следующей за ним волной большей, чем в 2 раза длительностью. Для детектирования фрагмента эпилептиформной активности мы использовали анализ взаимной корреляции функции (функция Matlab `xcorr`) записи ЭЭГ в каждой паре биполярных электродов с образцом отрицательного пика, в качестве которого выбирали отрицательный пик ЭЭГ в паре электродов C4-P4 в интервале времени около 3.5 сек. Зелеными точками отмечены максимальная и нулевые значения корреляции.

На **Рис. 3** приведена функция взаимной корреляции биполярного сигнала фрагмента ЭЭГ, представленного на Рис. 2, с выбранным образцом. Красным выделен фрагмент эпилептиформной активности, который определялся из трех условий согласно с описанием пик-волновых разрядов эпилептиформной активности:

1) значение положительной взаимной корреляции в пике корреляционной функции должно быть больше 0.4;

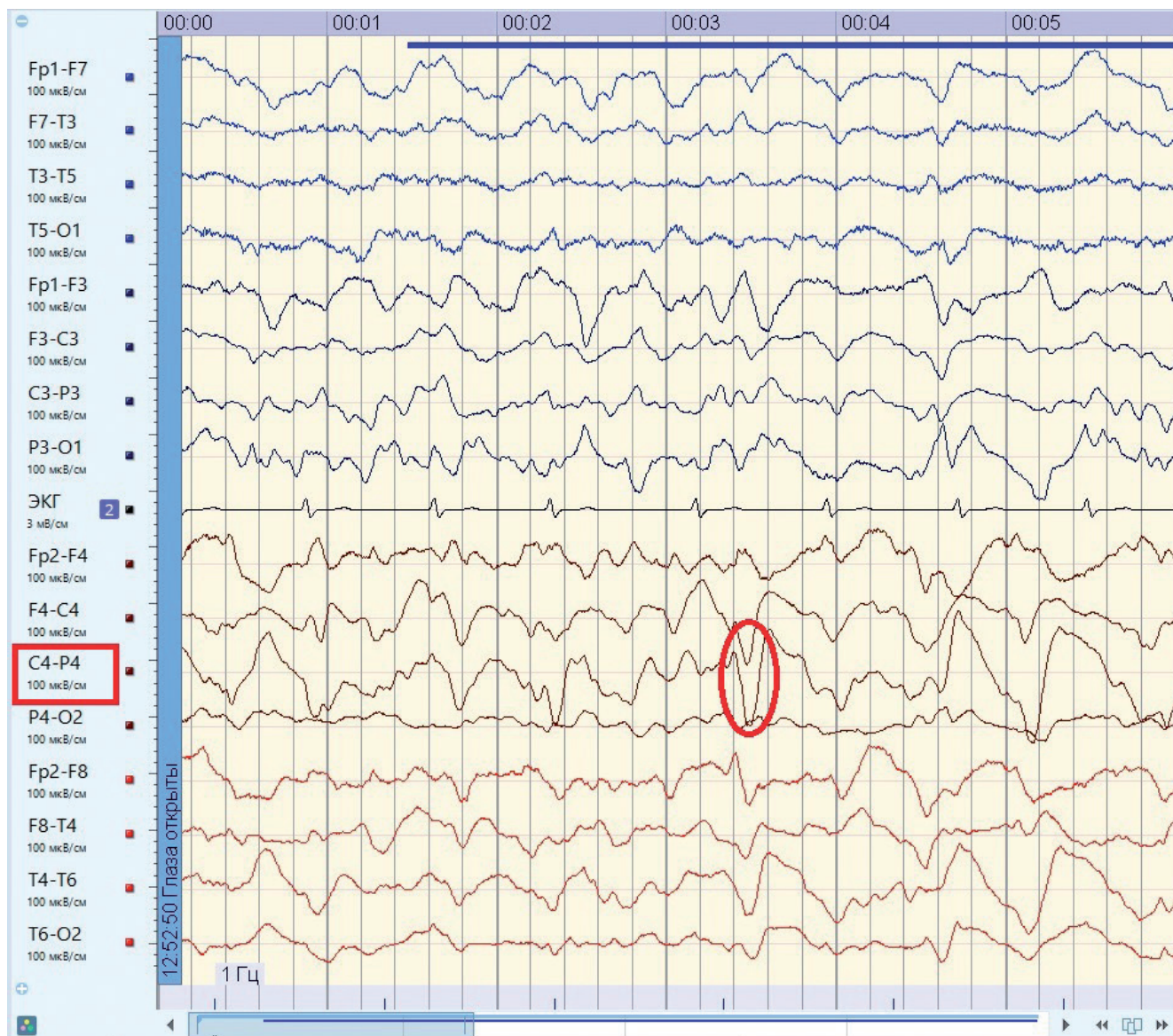


Рис. 2. 5-секундный фрагмент записи ЭЭГ с эпилептиформной активностью, обозначенной красным кругом.

2) следом за положительным пиком взаимной корреляции должен следовать пик с отрицательной корреляцией;

3) ширина пика отрицательной взаимной корреляции на полувисоте должна быть как минимум в 2 раза больше таковой у предшествующего положительного пика положительной взаимной корреляции.

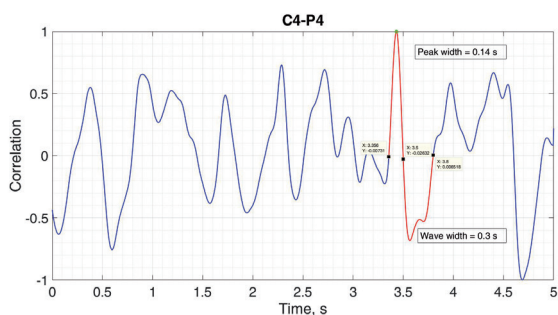


Рис. 3. Взаимная корреляция 5-секундного фрагмента ЭЭГ с отрицательным пиком ЭЭГ в паре электродов C4-P4 в интервале времени около 3,5-сек из Рис. 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ КЛИНИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ ЭЭГ

Анализировалась часовая запись ЭЭГ на 3-часу суточной записи 12.10.2023 г. до КТ исследований у пациентки Д., у которой был разрыв аневризмы правой внутренней сонной артерии. На КТ 15.10.2023 г. обнаружена гематома в зоне операции в правой лобно-височно-теменной области.

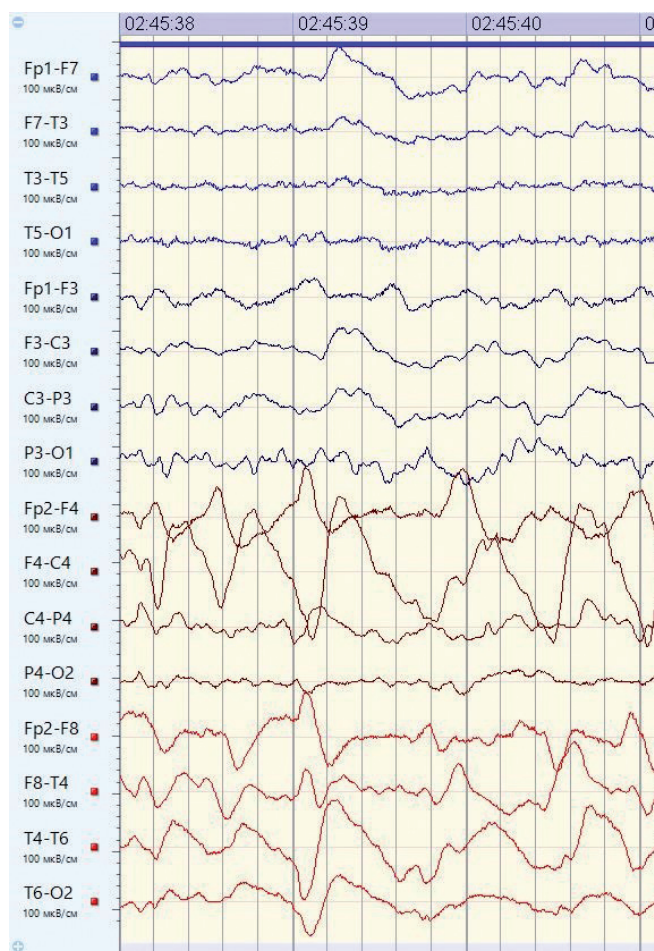


Рис. 4. Фрагмент ЭЭГ пациентки Д. в интервале времени 2 часа 45 минут 38 секунд – 2 часа 45 минут 41 секунда.

КТ от 18.10.10.2023 г. диагностирована ишемия в правой височной и затылочной долях части правого полушария. Следует отметить, что фрагмент ЭЭГ, в котором был выбран образец epileptiformной активности, представленный на Рис. 2, был записан в другой день ЭЭГ-мониторирования.

На **Рис. 4** в качестве примера представлен фрагмент ЭЭГ пациентки Д. в интервале времени 2 часа 45 минут 38 секунд – 2 часа 45 минут 41 секунда, котором визуально определяется epileptiformная активность. На **Рис. 5** приведены функции взаимной корреляции ЭЭГ с образцом, описанном в разделе 2. Красным выделены пики, соответствующие epileptiformной активности одновременно в 3-х биполярных

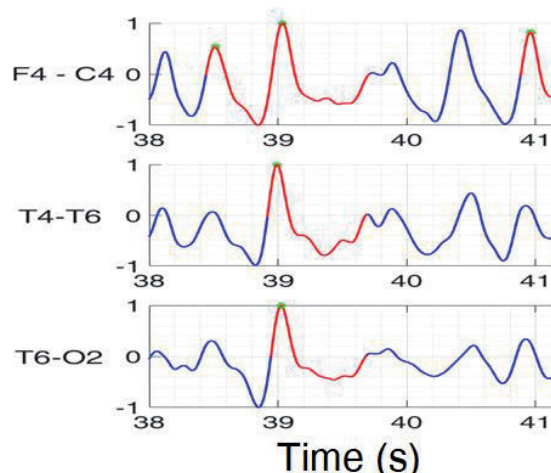


Рис. 5. Взаимная корреляция ЭЭГ, красным выделены пики, соответствующие epileptiformным разрядам. На графике время указано в секундах, отсчёт начинается с 2 часов 45 минут и 38-й секунды.

парах электродов F4-C4, T4-T6 и T6-O2 примерно на 39-секунде фрагмента и пик в одной биполярной паре электродов F4-C4 на 41-секунде.

При визуальном обнаружении epileptiformной активности нейрофизиолог выделяет одновременные пик-волновые разряды в нескольких электродах. Для исключения артефактного генеза разрядов с учётом явления объёмного распространения биоэлектрической активности, генерируемой церебральной корой, целесообразно выделять временные фрагменты с одновременными графоэлементами в 2-х и более близко расположенных биполярных парах электродов. Таких фрагментов за рассматриваемый час было выделено 17 в правом полушарии и 2 – в левом. Эта межполушарная асимметрия обусловлена правосторонней аневризмой у пациентки Д.

Время работы алгоритма на современном персональном компьютере составляет не более 5 минут для обработки 16 биполярных сигналов, поэтому он может быть использован для вычисления почасового количества epileptiformной активности

практически в реальном времени проявления этого показателя отсроченной ишемии после САК.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полезность количественной ЭЭГ в выявлении отсроченной ишемии головного мозга после аневризматического субарахноидального кровоизлияния. Она обеспечивает неинвазивную, непрерывную оценку активности мозга в режиме реального времени и требует относительно короткого времени для определения диагностических показателей отсроченной ишемии по сравнению с врачебной оценкой исходной ЭЭГ. С ростом доступности программного обеспечения, способного вычислять эти функции ЭЭГ в режиме реального времени, имеет большой клинический потенциал для своевременного лечения отсроченной ишемии. ЭЭГ может также использоваться в качестве инструмента скрининга пациентов с особенностями кЭЭГ для оценки высокого риска включения в клинические испытания, тестирующие новые методы лечения для смягчения и предотвращения отсроченной ишемии. Разработка многофункционального алгоритма, основанного на всех упомянутых выше функциях кЭЭГ, включая эпилептиформную активность, является следующим шагом в оптимизации алгоритма прогнозирования отсроченной ишемии, который может быть клинически реализован. В конечном счете, кЭЭГ является многообещающей модальностью, реализуемой в повседневной практике, позволяющей осуществлять неинвазивный мониторинг в режиме реального времени с глобальным охватом всего мозга. В то же время она имеет потенциальное преимущество в виде эффективности затрат и времени, особенно с учетом будущей разработки автоматизированных систем, которые могли бы способствовать оперативному

обнаружению и раннему вмешательству при отсроченной ишемии.

В настоящей статье описан предложенный нами алгоритм автоматического детектирования эпилептиформной активности ЭЭГ, основанный на формализации описания пик-волновых разрядов эпилептиформной активности и визуального ее обнаружения нейрофизиологами. Тестирование алгоритма на клинических данных показало его адекватность нейрофизиологическому описанию эпилептиформной активности при отсроченной ишемии после кровоизлияния в субарахноидальное пространство головного мозга.

Время работы алгоритма на современном персональном компьютере составляет не более 5 минут для обработки 16 биполярных сигналов, поэтому он может быть использован для вычисления почасового количества эпилептиформной активности практически в реальном времени проявления этого показателя отсроченной ишемии после аневризматического субарахноидального кровоизлияния. Поэтому мы полагаем, что применение разработанного алгоритма позволит решить проблему обнаружения эпилептиформной активности и оценки ее развития при отсроченной ишемии в реальном времени проявления этого показателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Foreman B. et al. Intracortical electrophysiological correlates of blood flow after severe SAH: A multimodality monitoring study. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 2018, 38(3):506-517.
2. Rosenthal Eric S. et al. Continuous Electroencephalography Predicts Delayed Cerebral Ischemia after Subarachnoid Hemorrhage: A Prospective Study of Diagnostic Accuracy. *ANN NEUROL*, 2018, 83:958-969.

3. Baang Hae Young et al. The Utility of Quantitative EEG in Detecting Delayed Cerebral Ischemia After Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2022, 39(3):207-215.
4. Muniz CF et al. Clinical development and implementation of an institutional guideline for prospective EEG monitoring and reporting of delayed cerebral ischemia. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2016, 33(3):217-226.
5. Синкин МВ, Крылов ВВ. Ритмичные и периодические паттерны ЭЭГ. Классификация и клиническое значение. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*, 2018, 118(10-2):9-20.
6. Kim JA et al. High epileptiform discharge burden predicts delayed cerebral ischemia after subarachnoid hemorrhage. *Clinical Neurophysiology*, 2022, 141:139-146.
7. Hyun-Joon Yoo et al. Quantification of stroke lesion volume using epidural EEG in a cerebral ischaemic rat model. *Scientific Reports*, 2021, 11:2308.
8. Mark L Scheuer, Anto Bagic, Scott B Wilson. Spike detection: Inter-reader agreement and a statistical Turing test on a large data set. *Clinical Neurophysiology*, 2017, 128(1):243-250.
9. Bazhenov M, Timofeev I, Fröhlich F, Sejnowski TJ. Cellular and network mechanisms of electrographic seizures. *Drug Discov Today Dis Models*, 2008, 5(1):45-57; doi: 10.1016/j.ddmod.2008.07.005.

Обухов Юрий Владимирович

д.ф.-м.н., г.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия
yuvobukhov@mail.ru

Кершнер Иван Андреевич

м.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия
ivan.kershner@gmail.com

Окунева Ирина Владимировна

н.с.

НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского,
Отделение неотложной нейрохирургии
3, Б. Сухаревская площадь, Москва 129090, Россия
okunevaiv@mail.ru

Синкин Михаил Владимирович

д.м.н., в.н.с.

НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского,
Отделение неотложной нейрохирургии
3, Б. Сухаревская площадь, Москва 129090, Россия
mvsinkin@gmail.com.